

学校编码：10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号：25320091151491

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

**基于性能目标和能量分析的超限高层  
建筑结构抗震设计及分析**

**Structural Seismic Design and Analysis of High-rise Buildings  
Based-on Performance Objective and Energy Analysis**

许泽瑶

指导教师姓名：林树枝 教授

张建霖 教授

专 业 名 称：结构工程

论文提交日期：2012 年 4 月

论文答辩时间：2012 年 6 月

学位授予日期：

答辩委员会主席：\_\_\_\_\_

评 阅 人：\_\_\_\_\_

2012 年 4 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为( )课题(组)的研究成果，获得( )课题(组)经费或实验室的资助，在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。)

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博士论文摘要库

## 摘 要

随着经济的发展和技术的进步,我国高层建筑发展十分迅速,且其规模、高度、复杂性及建设速度也将呈上升趋势,使得抗震设计的难度不断加大。尤其是我国的超限高层建筑的建造速度和高度都受到了世界瞩目,建造高度被突破的时间间隔越来越短。全国各地相继出现了各种形式的高层、超高层、及结构体系复杂的超限高层建筑,如何评估和保证超限高层建筑在地震作用下的安全性和可靠性变得尤为重要。2010 新颁布的《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》,重新划定了超限高层建筑的范围;提出了应根据结构超限情况、震后损失、修复难易程度和大震不倒等原则,确定抗震性能目标;技术要点还针对抗震设计做了具体的规定,明确了抗震专项审查内容。在以往研究的基础上,结合超限高层建筑工程抗震设防专项审查,本文提出基于性能目标和能量分析的方法,对超限高层结构的抗震设计及分析进行了研究,主要完成的工作如下:

(1) 本文详细划分了超限高层的各种超限形式,包括高度及高宽比超限、平面规则性超限、立面规则性超限、多重不规则超限等。结合国内外规范进行对比,分析结构的超限类型,对于国内规范未提及的超限形式,可参考国外规范进行综合判别。

(2) 根据复杂和超限高层建筑的设防烈度、场地条件、房屋高度、不规则的部位和程度,以及业主的经济实力选择结构在三个水准地震下的性能水准,从而实现相应的结构设计。选择复杂和超限高层建筑的结构性性能目标时,应综合考虑多个因素,详尽分析超限高层建筑结构的构件承载力、变形计算、屈服后的抗震性能,反映结构实际受力状态。

(3) 通过对某超限高层建筑结构进行多遇地震下振型分解法应谱法分析、弹性时程分析、中震不屈服和中震弹性分析、静力弹塑性分析以及弹塑性时程分析,进一步明确结构的抗震性能,反映结构在小震、中震、大震地震下的受力状态,对超限高层建筑结构提出不同设防目标下的具体要求,更有助于设计人员分析结构,合理地进行性能化设计。

(4) 针对超限高层结构主要的超限类型,高度及高宽比超限、平面规则性超

限、立面规则性超限及多重不规则超限进一步提出设计要点和加强措施，对存在上述超限的结构深入分析，结合项目具体情况对其进行超限技术审查及评价。此外，还对新型抗震结构做一个初步的探讨。

(5) 通过算例分析提出将结构的能量分析作为超限高层结构抗震性能评估指标之一，以结构的能量时程反应来描述结构在地震作用下的抗震性能。在结构满足强度和位移指标的情况下，两种方法相互结合，进一步把结构的能量分析作为补充分析，提出以强度、位移、能量分析等综合指标才能全面综合评估结构的抗震性能，并初步建立了基于能量分析的超限高层建筑结构的设计方法。

**关键词：**超限高层建筑结构；性能目标；能量分析；设计要点；加强措施。

## ABSTRACT

In the past decades, there are many high-rise buildings appearing rapidly all over China with the development of economics and technology. Most of them are with complicated shape or complex structure, even much higher beyond the code. As a result, it is very important and necessary to analyse and evaluate the dynamic response of super high-rise building under earthquake loads. In 2010, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of PRC had issued a new regulation for special technical examination of seismic fortification for high-rise buildings beyond code limit. It had reset the range of these buildings and proposed that it shall determine the seismic performance-based goal based on the structural system, the earthquake loss assessment and the retrofit after quake. The files had made the rules for seismic design and the content of the technical examination. This regulation proposes the new principle and key points for seismic design with different type, and set specific objective for different seismic intensity districts. In this paper, a new method based on performance objective and energy analysis concept for dynamic analysis and design of high-rise buildings is proposed according to the new regulation. Following is the main content of this paper:

(1) This paper classifies the out-of-code high-rise buildings into four categories, including beyond height and height-width ratio, plane irregularity, elevation irregularity and complex irregularity. According to the domestic and abroad codes, it proposes the forms and contents of them making full use of foreign codes.

(2) According to the complexity, fortification intensity, site condition, irregularity of high-rise building and investor's economic strength, this paper gives a method for choosing the performance-based objective to design structure. When its objective is chosen, all of them should be considered synthetically to analysis capacity of components, bearing capacity of components, deformation calculation and seismic performance after yielding to obtain the structural loading state.

(3) A project is analysed by response spectrum method, elastic time-history method, under frequent earthquake, non-yielding design and elastic design under

moderate earthquake, push-over and elastic-plastic time-history method to realize the performance design and the structural loading state, which will help the designer to design structure reasonably.

(4)The key points of design and the earthquake-resistant measures are given based on the characteristics of the bearing capacity according to the type of its categories, which are super height and height-width ratio, plane irregularity, elevation irregularity and complex irregularity. The structure is analysis deeply considering the condition of project to review and assess the seismic performance. In addition, a new seismic structure is studied primarily.

(5)This paper proposes a new method based on energy analysis to assess the seismic performance of structure, which calculates the time-history energy response under the earthquake load. In the case of enough bearing capacity and displacement controlling condition, the energy analysis method is an complementation of performance-based design to assess the structure comprehensively, and the energy-based design method is established primarily.

**Key Words:** High-rise Building; Performance Objective; Energy Analysis; Key Points of Design; Seismic Measures.



# 目 录

<b>第一章 绪 论</b>	<b>1</b>
1.1 高层建筑与结构抗震设计方法综述	1
1.1.1 高层建筑结构发展与现状	1
1.1.2 建筑结构抗震设计方法的发展	4
1.2 本文研究背景及热点问题	5
1.2.1 研究背景与论文选题	5
1.2.2 超限高层建筑结构的特点、类型、判定及研究热点问题	6
1.2.3 超限高层建筑工程抗震设防专项审查	27
1.3 本文研究内容	28
<b>第二章 基于性能目标的抗震设计理论</b>	<b>30</b>
2.1 概述	30
2.2 结构抗震性能水准	31
2.2.1 性能水准的划分	31
2.2.2 性能水准的判别准则	31
2.3 结构抗震性能目标	34
2.3.1 基本设防目标的确定	34
2.3.2 结构的抗震性能目标的组成	35
2.3.3 结构的抗震性能目标的选用	36
2.4 结构抗震性能设计要求	38
2.4.1 结构计算模型	38
2.4.2 电算结果的分析	38
2.4.3 时程分析的应用	39
2.4.4 竖向地震分析	40
2.4.5 薄弱层变形分析	40
2.4.6 结构抗震试验要求	41
2.5 超限高层性能目标的确定实例	42
2.6 小结	48
<b>第三章 超限高层建筑结构抗震设计及计算方法</b>	<b>49</b>
3.1 多遇地震（小震）作用下的弹性分析	49
3.1.1 多遇地震（小震）的特点	49
3.1.2 振型分解反应谱法	49
3.1.3 算例 1	58
3.1.4 算例 2	60
3.1.5 工程场地安全性评估	67
3.1.6 弹性动力时程分析	68
3.2 偶遇地震（中震）作用下的结构承载力复核	74
3.2.1 偶遇地震（中震）的特点	74

3.2.2 中震弹性设计.....	74
3.2.3 中震不屈服设计.....	75
3.2.4 中震弹性与中震不屈服参数对比分析.....	75
3.2.5 中震弹性与中震不屈服计算结果.....	79
<b>3.3 罕遇地震（大震）作用下的弹塑性分析 .....</b>	<b>81</b>
3.3.1 罕遇地震（大震）的特点.....	81
3.3.2 静力弹塑性分析.....	82
3.3.3 动力弹塑性时程分析.....	91
<b>3.4 小结 .....</b>	<b>99</b>
<b>第四章 超限高层建筑结构抗震设计要点及加强措施 .....</b>	<b>102</b>
<b>4.1 高度及高宽比超限结构抗震设计要点及分析 .....</b>	<b>102</b>
4.1.1 设计要点及加强措施.....	102
4.1.2 工程实例.....	103
<b>4.2 平面不规则结构抗震设计及分析 .....</b>	<b>114</b>
4.2.1 设计要点及加强措施.....	114
4.2.2 工程实例.....	115
<b>4.3 竖向不规则结构抗震设计及分析 .....</b>	<b>120</b>
4.3.1 设计要点及加强措施.....	120
4.3.2 工程实例.....	121
<b>4.4 多重不规则结构抗震设计及分析 .....</b>	<b>126</b>
4.4.1 设计要点及加强措施.....	126
4.4.2 工程实例.....	127
<b>4.5 新型结构抗震设计 .....</b>	<b>133</b>
<b>4.6 小结 .....</b>	<b>139</b>
<b>第五章 基于能量分析的超限高层抗震原理 .....</b>	<b>141</b>
<b>5.1 基于能量分析的抗震设计概述 .....</b>	<b>141</b>
<b>5.2 能量分析的原理和反应方程 .....</b>	<b>142</b>
5.2.1 能量分析的原理.....	142
5.2.2 能量分析的反应方程.....	142
5.2.3 能量反应方程的求解.....	144
<b>5.3 算例 .....</b>	<b>146</b>
5.3.1 结构参数.....	146
5.3.2 输入地震波.....	146
5.3.3 结果分析.....	147
<b>5.4 基于能量分析的抗震设计方法 .....</b>	<b>153</b>
5.4.1 设计要求.....	153
5.4.2 设计的输入能量谱.....	154
5.4.3 设计的基本框架.....	158
<b>5.5 小结 .....</b>	<b>160</b>
<b>第六章 结论与展望 .....</b>	<b>162</b>
<b>6.1 主要结论 .....</b>	<b>162</b>

6.2 进一步工作展望 .....	165
[参考文献] .....	167
致 谢 .....	172
攻读硕士学位期间发表论文目录 .....	173

厦门大学博硕士论文摘要库

# CONTENTS

<b>Chapter 1 Preface .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introduction of High-rise Building and Structural Seismic Design Method .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Development and Present Situation of High-Rise Building .....	1
1.1.2 Development of Structural Seismic Design Method .....	4
<b>1.2 The Background of The Research and The Hot Research Points .....</b>	<b>5</b>
1.2.1 Background of The Research and Choosing Topic of The Paper .....	5
1.2.2 Characteristics, Categories, Judgment and Hot Research Points of High-Rise Building .....	6
1.2.3 The Special Technical Examination of Seismic Fortification for High-Rise Building .....	27
<b>1.3 Main Work Of This Paper.....</b>	<b>28</b>
<b>Chapter 2 The Theory of Seismic Design Method Base-on Performance Objective.....</b>	<b>30</b>
<b>2.1 Introduction .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2 Structural Seismic Performance Level .....</b>	<b>31</b>
2.2.1 Classification of Performance Level.....	31
2.2.2 Discrimination Standard of Performance Level .....	31
<b>2.3 Structural Performance-Based Objective.....</b>	<b>34</b>
2.3.1 Definition of Basic Seismic Precautionary Objective .....	34
2.3.2 Combination of Basic Seismic Precautionary Objective .....	35
2.3.3 Selection of Basic Seismic Precautionary Objective .....	36
<b>2.4 Requirement of Seismic Design Base-on Performance.....</b>	<b>38</b>
2.4.1 The structural Model .....	38
2.4.2 Analysis of Computational Software .....	38
2.4.3 Application of Time-history Method .....	39
2.4.4 Vertical Seismic Analysis.....	40
2.4.5 Deformation Analysis of Weak Story .....	40
2.4.6 Seismic Test Requirement.....	41
<b>2.5 Performance Level of Projects.....</b>	<b>42</b>
<b>2.6 Conclusions.....</b>	<b>48</b>
<b>Chapter 3 The Seismic Design Method and Calculation of High-Rise Building.....</b>	<b>49</b>
<b>3.1 The Elastic Analysis Under Frequent Earthquake .....</b>	<b>49</b>
3.1.1 Characteristic of Frequent Earthquake.....	49

3.1.2 Mode-Superposition Response Spectrum Method.....	49
3.1.3 Numerical Example 1 .....	58
3.1.4 Numerical Example 2 .....	60
3.1.5 Security Evaluation of Engineering Site.....	67
3.1.6 Elastic Time-history Analysis .....	68
<b>3.2 Recheck Of Structural Bearing Capacity Under Moderate Earthquake</b>	<b>74</b>
3.2.1 Characteristic of Moderate Earthquake .....	74
3.2.2 Elastic Design Under Moderate Earthquake.....	74
3.2.3 Non-Yielding Design Under Moderate Earthquake.....	75
3.2.4 The Comparison of Calculating Parameters .....	75
3.2.5 The Comparison of Result .....	79
<b>3.3 Elastic-Plastic Analysis Under Rare Earthquake .....</b>	<b>81</b>
3.3.1 Characteristic of Rare Earthquake .....	81
3.3.2 Push-over Analysis .....	82
3.3.3 Elastic-Plastic Time-history Analysis .....	91
<b>3.4 Conclusions.....</b>	<b>99</b>
<b>Chapter 4 The Key Points of Seismic Design and Measures of</b>	
<b>High-rise Buildings .....</b>	<b>102</b>
<b>4.1 The Key Points of Design and Analysis of the High-rise Buildings Beyond</b>	
<b>Height and Height-width Ratio.....</b>	<b>102</b>
4.1.1 The Key Points of Design and Seismic Measures .....	102
4.1.2 Project Analysis .....	103
<b>4.2 The Key Points of Design and Analysis of the High-rise Buildings Beyond</b>	
<b>Plane Regularity.....</b>	<b>114</b>
4.2.1 The Key Points of Design and Seismic Measures .....	114
4.2.2 Project Analysis .....	115
<b>4.3 The Key Points of Design and Analysis of the High-rise Buildings Beyond</b>	
<b>Vertical Regularity .....</b>	<b>120</b>
4.3.1 The Key Points of Design And Seismic Measures .....	120
4.3.2 Project Analysis .....	121
<b>4.4 The Key Points of Design and Analysis of the High-rise Buildings</b>	
<b>Including Multi-irregularity .....</b>	<b>126</b>
4.4.1 The Key Points of Design and Seismic Measures .....	126
4.4.2 Project Analysis .....	127
<b>4.5 Design and Analysis of New Structural Seismic Type.....</b>	<b>133</b>
<b>4.6 Conclusions.....</b>	<b>139</b>
<b>Chapter 5 The Theory of Seismic Design Method Base-on Energy</b>	
<b>Analysis .....</b>	<b>141</b>
<b>5.1 Introduction .....</b>	<b>141</b>
<b>5.2 Principle and Reaction Equation of Energy Analysis.....</b>	<b>142</b>

5.2.1 Principle of Energy Analysis .....	142
5.2.2 Reaction Equation of Energy Analysis .....	142
5.2.3 Reaction Equation Solving of Energy Analysis.....	144
<b>5.3 Numerical Example .....</b>	<b>146</b>
5.3.1 Parameters of Structure.....	146
5.3.2 Earthquake Wave .....	146
5.3.3 Result Analysis.....	147
<b>5.4 The Seismic Design Method Base-on Energy Analysis.....</b>	<b>153</b>
5.4.1 Requirement of Design .....	153
5.4.2 Energy Spectrum of Design .....	154
5.4.3 Basic Framework of Design.....	158
<b>5.5 Conclusions .....</b>	<b>160</b>
<b>Chapter 6 Conclusions and Issues for Further Study .....</b>	<b>162</b>
6.1 Conclusions of This Paper .....	162
6.2 Important Issues for Further Study.....	165
<b>References .....</b>	<b>167</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>172</b>
<b>List of Published or Accepted Papers .....</b>	<b>173</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 高层建筑与结构抗震设计方法综述

#### 1.1.1 高层建筑结构发展与现状

随着经济的发展和技术的进步,19 世纪 80 年代至今,近代高层建筑的发展主要经历了以下三个阶段<sup>[1]</sup>:

1. 第一阶段从 19 世纪 80 年代到 20 世纪 30 年代初,其特点是:钢结构体系发展迅速,促成了第一次高层建筑热潮;钢筋混凝土结构发展缓慢;砖石结构的高层建筑发展迅速。

铁、钢材料的使用促进了轻骨架结构的发展,允许建筑高度增加和内部大空间及大开窗。建于 1883 年的 11 层芝加哥 Home Insurance 大楼是第一幢完全用金属框架承重的高层建筑;建于 1889 年的 9 层 Rand-McNall 大楼是第一幢全钢框架结构的高层建筑。建于 1913 年的纽约 Metropolitan 大厦,高度 50 层;1909 年纽约的“都市生活”办公楼高度达 213m;1913 年纽约的 Woolworth 大楼达到了 60 层 242m。从 1929 年到 1933 年美国又相继建成了 9 幢 200m 以上的高层钢结构建筑,其中美国纽约的帝国大厦采用了钢框架支撑结构,共 102 层 351m。

钢筋混凝土结构在 19 世纪已经开始出现,但是发展十分缓慢,而且是间断的。最早的钢筋混凝土结构高层建筑是 1903 年建造的美国辛辛纳提城的 16 层的 Ingall 大楼,直到 1931 年最高的钢筋混凝土建筑仅达到 23 层,即美国西雅图的 Exchange 大楼,其结构体系均为框架结构,与钢结构的最初体系类似。

从 19 世纪末,美国南部大量的砖石结构高层建筑迅速发展,这种结构形式最高的建筑是建造于 1891 年的 16 层芝加哥 Monadnock 大楼,该建筑下部墙体厚度超过 2m,占去了大量的楼面面积,这是美国城市中最后一幢采用巨大的砖石承重墙的高层建筑。

2. 第二阶段从 20 世纪 60 年代到 80 年代,其特点是:钢结构涌现了多个新结构体系;钢筋混凝土结构体系有了全新的发展;钢-混凝土混合结构产生并迅速发展。

20 世纪 60 年代到 80 年代, 高层钢结构的发展呈现了新的飞跃, 200m 以上的钢结构建筑约 46 幢。1969 年美国芝加哥建造了 John Hancock Center, 100 层, 344m, 采用了带斜撑的外框筒结构体系; 1973 年纽约世界贸易中心的一对姐妹楼采用框筒结构内设黏弹性阻尼装置, 其高度达 412m, 110 层; 1974 年芝加哥建造了 442m 高的 Sears 大厦, 采用成束筒结构, 其用钢量比 1931 年建造的帝国大厦约减少 20%。

高层钢筋混凝土结构在二次大战后迅速发展。战后房屋的大量恢复重建, 使许多国家采用了用钢量少、价格便宜、材料易得、施工简便的钢筋混凝土结构, 尤其是钢筋混凝土剪力墙在工程中的应用, 使高层钢筋混凝土结构体系出现了全新的发展。剪力墙结构、框架-剪力墙结构、框架-筒体结构、筒中筒结构、带转换层结构等体系陆续涌现, 混凝土和钢材强度等级不断提高, 使高层钢筋混凝土结构的高度飞跃发展, 而且能适应多种建筑形式和功能的需求。这一阶段高度超过 200m 的钢筋混凝土结构约 13 幢, 最高的是美国芝加哥的水塔广场 74 层, 262m。

钢-混凝土混合结构是一种新的结构类型, 由钢构件、钢与混凝土组合构件和钢筋混凝土构件相结合组成。这些构件的组合形式较多, 从而可形成多种结构体系, 有效地发挥钢构件、钢与混凝土组合构件及钢筋混凝土构件各自的优点, 使整体结构的侧向刚度比钢结构显著增加、用钢量减少、造价较低。与钢筋混凝土结构相比较, 其优点是: 可减轻自重、施工速度有所加快、结构占用的面积和空间有所减少; 缺点是: 钢筋混凝土构件与钢构件的刚度、延性性能相差较多, 两者有效地协同工作有待于进一步研究。钢-混凝土混合结构在这一阶段发展迅速, 建成的 200m 以上的建筑约 18 幢, 主要建造在非地震区或低烈度区, 最高的一幢是香港中银大厦, 70 层, 369m。

3. 第三阶段从 20 世纪 90 年代到 21 世纪初, 高层建筑的发展出现两个变化: 其一是高层钢筋混凝土结构及混合结构的发展速度超过高层钢结构; 其二为亚洲、中国高层建筑的发展出现了新的飞跃, 成为世界上兴建高层建筑的主要区域。

根据文献[1]做的统计, 20 世纪 30 年代初之前 200m 以上的建筑全部采用钢结构; 20 世纪 70 年代是高层钢结构发展的鼎盛时期; 20 世纪 80 年代开始高层混合结构及钢筋混凝土结构迅速发展, 到 20 世纪 90 年代和 21 世纪初其发展速度已超过钢结构, 1998 年建成的马来西亚吉隆坡石油大厦(88 层, 452m), 以及



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库